

doi: 10.7690/bgzd.2021.12.020

# 基于 WSEIAC 模型的某型末端防御武器系统效能评估

车国帅<sup>1</sup>, 戚振东<sup>2</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 杜昕民<sup>1</sup>

(1. 火箭军工程大学研究生院, 西安 710025; 2. 火箭军工程大学初级指挥系, 西安 710025)

**摘要:** 为增强末端防御能力, 建立末端防御武器系统效能评价指标体系和 WSEIAC 效能评估模型进行效能评估。确定武器系统的有效度、可信度和完成任务的能力, 并计算出武器系统综合效能, 为末端防御武器系统的设计、研制、作战使用和优化配置等提供参考依据。计算结果表明, 该末端防御武器系统的效能评估能为指挥决策和装备研制提供参考。

**关键词:** 末端防御武器系统; WSEIAC 模型; 效能评估

**中图分类号:** TJ819 **文献标志码:** A

## Effectiveness Assessment of Certain Type End Defense Weapon System Based on WSEIAC Model

Che Guoshuai<sup>1</sup>, Qi Zhendong<sup>2</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Du Xinmin<sup>1</sup>

(1. College of Graduate, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Department of Primary Command, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** To enhance the capability of end defense, sets up an efficient evaluation index system and efficient evaluation WSEIAC model of end defense weapon system by efficient evaluation. Confirm the effectiveness, trustworthiness and ability to complete the task of weapon system. By calculating the comprehensive efficiency of weapon system, the paper aims to provide references for design, research and manufacture, operational use and optimized allocation of weapon system. The calculation results show that the efficient evaluation of end defense weapon system can provide some references for commanding and decision-making, researching and manufacturing equipment.

**Keywords:** end defense weapon system; WSEIAC model; effectiveness evaluation

### 0 引言

随着科学技术的不断发展, 新兴作战力量使战场变得越发透明化。掌握信息权就掌握战场主动权。无人机作战将成为未来主要作战样式, 具有智能化、一体化、集群化、隐身化的发展趋势, 地面装甲部队将受到严重的生存威胁, 必须增强末端防御能力, 为地面部队提供野战伴随防空掩护保障。

### 1 末端防御武器系统发展现状

末端防御武器系统<sup>[1]</sup>现已成为防空反导装备体系中的一个重要组成部分, 其作战任务是对重要目标进行末端防御, 保护我方作战力量的安全。

防空导弹具有射程远、可靠性强和命中精度高的优点, 在其射程范围内能够拦截大部分来袭武器, 但其作战具有近距离盲区大、携带数量少、制造成本高、抗干扰能力不强等弱点, 对导弹作战效能的发挥有很大影响。火炮具有射速快、成本低、不易受干扰、近距离命中精度高和反应迅速等优点, 能

够提供一定的机动防空掩护, 但是拦截距离有限。末端防御武器系统将火炮和近程防空导弹集成在一辆装备上, 极大提高了系统的机动能力, 可发挥导弹射程远、命中精度高和火炮抗干扰能力强、射速快的优势, 达到优势互补、取长补短的效果, 系统能够在一定的区域内构成火力叠加拦截网, 实现对目标的多次拦截, 加强对重要目标的防卫。

我国防空力量主要由红旗防空导弹部队和火炮部队组成, 为了加强对地面机械化部队的伴随防空掩护能力, 野战防空“PGZ-04A”系统应运而生。该系统是我国自行研制的全自动、全天候、可行进间射击的末端防御武器系统, 武器模块为 4 门 25 mm 机关炮和 4 枚“飞弩-6”防空导弹。机关炮除用于打击飞行器外, 还可有效打击地面轻型装甲装备和敌有生力量; 防空导弹采用红外寻的制导, 抗干扰能力强, 能够拦截大部分来袭导弹。

美国末端防御武器系统发展注重联合进攻能力, 主要有以下特点: 1) 参与争夺制空权, 与航空

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-22

作者简介: 车国帅(1993—), 男, 四川人, 从事末端防御研究。E-mail: 1304909486@qq.com。

兵联合作战；2) 依靠情报信息优势歼灭敌空中力量；3) 灵活轻便，能快速实施全球兵力投送<sup>[2]</sup>。美军认为当前作战环境已发生改变，美军的敌人由路边炸弹和自爆袭击转向非视距袭击，经常用火箭炮、迫击炮这类可躲在视线外的武器曲线攻击美军，暴露出美军在短距离近程防空能力薄弱的问题。2018 年美国宣布重塑防空系统概念和结构，现已采用莱昂纳多的“IM-SHORAD”系统方案，其主要特点是武器平台集成化、模块化、通用化和系列化，作为其“过渡近程防空系统”，能够满足未来新兴作战需求。

俄罗斯末端防御武器系统的发展思路是“能够为地面装甲部队提供伴随防空掩护”，在设计上突出 2 个特点：1) 具有很强的超低空目标拦截能力；2) 防空导弹的有效射程不低于机载反坦克导弹。典型系统主要有“通古斯卡”“卡什坦”以及“铠甲”等，这些装备均经历过实战的检验，末端防御能力显著。

## 2 效能评估方法及其评价指标体系

### 2.1 效能评估方法

评估武器系统效能的方法较多，按所采用的数学方法不同，可分为统计法、作战模拟法和解析法<sup>[3]</sup>。

1) 统计法指在特定环境条件下，通过试验、演习、实践等获得大量统计数据的评价方法，得到的效能评估值比较准确；但需要大量的试验基础支撑，且无法在武器研制前实施，准备周期较长。

2) 作战模拟法是通过计算机建立模拟作战环境，在一定条件限制下进行仿真试验，得到效能指标评估值的方法。该方法比较容易实现，但得到的效能指标估值局限性较大，不够准确。

3) 解析法是根据给定条件与效能指标之间的关系，建立函数解析式并计算效能评估值的评估方法。该方法直观形象、简洁易懂、易于计算，但影响因素考虑不够全面。

以上 3 种方法优缺点均比较明显，统计法成本大、耗时长，模拟法受限多、不准；因此，在进行效能评估时多采用解析法。

各国在使用解析法进行效能评估时提出了多种评估模型：1) 美国工业界武器系统效能咨询委员会于 1965 年提出的 WSEIAC 模型<sup>[4]</sup>，表达式为  $E=A \cdot D \cdot C$ ；2) 美国海军的 AN 模型，表达式为  $E=P \cdot A \cdot V$ ；3) 美国航空无线电研究公司的 ARINC 模型，表达式为  $P_{SE}=P_{OR} \cdot P_{MR} \cdot P_{OA}$ ；4) 美国陆军导

弹的 AAM 模型，表达式为  $E_{FE}=A_O \cdot P_{DC} \cdot P_{KSS}$ ；5) 前苏联在 20 世纪 70 年代初提出的系统效能模型，表达式为  $E=W_L \cdot W_K \cdot W_R$ 。

国内武器系统进行效能评估时多采用 WSEIAC 模型，简洁明了、清晰易懂；因此，笔者基于 WSEIAC 模型对该型末端防御武器系统进行效能评估。

### 2.2 效能评价指标体系

随着武器装备的更新换代，末端防御武器系统也正从传统的弹炮分布式配置转向集成一体化发展，由静态防御转向动态防御。集成一体化模式指将探测搜索系统、电子对抗系统、指挥控制系统和火力拦截系统等集成在一辆作战装备上，导弹与火炮集成配置，系统反应迅速、拦截精度高、指挥控制高效、机动生存能力强，能够实现两者优势互补、取长补短，也能在机动条件下为地面装甲部队提供野战防空掩护保障。

根据末端防御武器系统的结构组成，分析各分系统在实际作战过程中的作用及影响，将复杂问题层次化、条理化，建立科学合理、贴近实际的效能评价指标体系，实现系统工作过程的准确描述，为提高系统效能提供参考。据此，建立末端防御武器系统效能评价指标体系如图 1 所示。

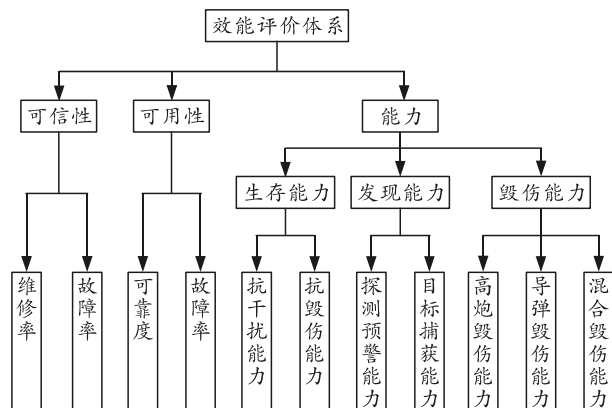


图 1 末端防御武器系统效能评估指标体系

## 3 末端防御武器系统效能评估模型

武器系统综合效能集中反映了武器系统在整个作战过程中完成某项任务的综合能力，是武器系统装备性能、设备可靠情况和完成相应任务的综合性指标。

WSEIAC 模型可根据效能指标与分系统间建立的函数解析式，准确描述系统效能与效能指标之间的关系，并用数学方法建立效能评估模型，求得武器系统的系统效能评估值，能够较全面地反映武器系统在作战过程中处于不同状态条件下多项技战术

指标的综合作用。

### 3.1 系统效能( $E$ )

武器系统效能是武器系统处于不同状态下完成上级赋予任务的综合能力的集中反映,对末端防御武器系统进行效能评估,用“有效度”描述系统的初始状态,用“可信赖度”描述系统任务过程中的行动状态,用“能力”描述系统完成相关任务的概率程度。基于 WSEIAC 模型对该型末端防御武器系统进行效能评估,其解析表达式如下:

$$E=A \cdot D \cdot C。(1)$$

式中: $E$  为系统效能,是系统完成相关任务的综合能力; $A$  为有效度向量,是系统在任务开始时初始状态的概率量度; $D$  为可信赖度矩阵,是各个分系统在任务过程中由初始状态转化为其他状态的概率量度; $C$  为能力矩阵,是系统完成相关任务能力的概率量度。

### 3.2 有效度向量( $A$ )

有效度向量  $A$  是初始状态下系统所处不同状态的概率矩阵,与武器系统自身可靠性、战场环境、器材保障能力、维修人员数量及水平、故障发生概率等诸多因素有关,即:

$$A=[a_1, a_2, \dots, a_n]。(2)$$

式中系统只处于一种初始状态,故所有状态概率之和为 1,即:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1。(3)$$

式中  $a_i$  为系统在任务开始时处于状态  $i$  的概率。末端防御武器系统的各个分系统都能处于工作状态或故障状态,即  $A=[a_1, a_2]$ ,工作状态概率用  $a_1$  表示,故障状态概率用  $a_2$  表示。结合装备相关参数,系统工作状态概率  $a_1$  可表示为:

$$a_1 = \frac{T_{MTBF}}{T_{MTBF} + T_{MTTR}}。(4)$$

式中: $T_{MTBF}$  为系统平均故障间隔时间; $T_{MTTR}$  为系统平均修复时间。同理,系统故障概率  $a_2$  可表示为:

$$a_2 = \frac{T_{MTTR}}{T_{MTBF} + T_{MTTR}}。(5)$$

### 3.3 可信赖度矩阵( $D$ )

可信赖度矩阵  $D$  是各个分系统在任务开始时的初始状态,执行任务过程中某个状态转化为其他状态的情况,即:

$$D=(d_{ij})_m = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}。(6)$$

式中各个分系统所处行的状态是唯一的,每一行的行向量和为 1,即:

$$\sum_{i=1}^n d_{ij} = 1。(7)$$

式中  $d_{ij}$  为系统在任务开始时  $i$  状态转换为任务过程中  $j$  状态的概率。

### 3.4 能力矩阵( $C$ )

能力矩阵  $C$  为已知任务期间各系统所处的状态,在该条件下系统完成某项任务的概率矩阵,直接体现了系统运行的稳定程度和完成某项任务的能力大小。末端防御武器系统完成任务的能力大小通过拦截来袭武器的概率来体现,由导弹拦截概率和高炮拦截概率组成,即:

$$C=(c_{ij})_{m \times n}。(8)$$

式中  $c_{ij}$  为系统在  $i$  状态条件下,某一分系统处于  $j$  状态的概率。

系统效能的计算公式为:

$$E=A \cdot D \cdot C=[a_1, a_2, \dots, a_n] \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}。(9)$$

## 4 末端防御武器系统效能评估举例

某型末端防御武器系统是我军野战防空的主战力量,机动性强,集成化程度高,拦截效果显著,能够为地面装甲部队提供较好的伴随防空掩护。为检验武器系统在实际作战中的综合效能,对该系统进行定性定量分析,客观评价武器系统效能。该系统主要由探测搜索、指挥控制、电子对抗和火力拦截 4 个分系统共同组成,考虑武器系统效能受到综合因素的影响,重点对雷达系统、导弹拦截系统和火炮拦截系统的性能进行分析。根据武器系统相关参数可知:雷达系统平均故障间隔时间  $MTBF_1$  为 50 h,平均故障修复时间  $MTTR_1$  为 1 h;导弹系统平均故障间隔时间  $MTBF_2$  为 80 h,平均故障修复时间  $MTTR_2$  为 0.5 h;火炮系统平均故障间隔时间  $MTBF_3$  为 40 h,平均故障修复时间  $MTTR_3$  为 0.5 h,它们组成一个作战单元,完成各自规定的作战任务,主要作战流程如图 2 所示。

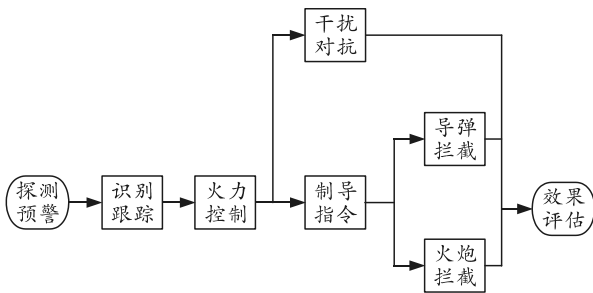


图 2 主要作战流程

探测搜索系统通过雷达完成对目标的预警定位，对目标进行识别跟踪和威胁判断，形成制导指令。全程实施电子干扰对抗，破坏空袭武器的攻击信息，实现对保卫目标的软防护；当来袭武器进入导弹拦截区域后，导弹根据目标威胁程度进行一次或多次拦截，目标距离较近时，由火炮进行拦截，从而实现多层拦截，提高了对来袭武器的拦截概率。该型末端防御武器系统性能指标的效用值数据<sup>[5]</sup>如表 1 所示。

表 1 末端防御武器系统性能指标的效用值

雷达系统	导弹系统	火炮系统
0.8	0.8	0.7

根据各分系统在实际作战运用中发挥的不同作用，确定各分系统相关性能指标因素所占权重如下： $W=(0.5, 0.3, 0.2)$ 。结合该型末端防御武器系统实际作战需求，按系统连续作战 8 h，运用 WSEIAC 模型求取武器系统效能。

### 4.1 系统有效度计算

$A$  有工作状态和故障状态， $a_1$  为 3 个分系统均处于工作状态的概率， $a_2$  为雷达系统和一个拦截系统处于工作状态的概率， $a_3$  为系统处于故障状态的概率，即  $A=[a_1, a_2, a_3]$ 。该型末端防御武器系统工作状态如表 2 所示，表中 T 为系统处于工作状态，F 为系统处于故障状态。

表 2 该型末端防御武器系统工作状态

状态	雷达系统	导弹系统	火炮系统	工作状态
1	T	T	T	T
2	T	T	F	T
3	T	F	T	T
4	T	F	F	F
5	F	T	T	F
6	F	T	F	F
7	F	F	T	F
8	F	F	F	F

$$a_L = \frac{MTBF_1}{MTBF_1 + MTTR_1} = \frac{50}{50 + 1} = 0.980;$$

$$a_T = \frac{MTBF_2}{MTBF_2 + MTTR_2} = \frac{80}{80 + 0.5} = 0.994;$$

$$a_R = \frac{MTBF_3}{MTBF_3 + MTTR_3} = \frac{40}{40 + 0.5} = 0.988. \quad (10)$$

式中： $a_L$  为雷达系统处于工作状态的概率； $a_T$  为导弹系统处于工作状态的概率； $a_R$  为火炮系统处于工作状态的概率。

3 个分系统均处于工作状态的概率：

$$a_1 = a_L a_T a_R = 0.980 \times 0.994 \times 0.988 = 0.962. \quad (11)$$

雷达系统处于工作状态，导弹系统或火炮系统一个处于工作状态，另一个处于故障状态的概率：

$$a_2 = a_L [a_T(1 - a_R) + (1 - a_T)a_R] = 0.980 \times [0.994 \times (1 - 0.988) + (1 - 0.994) \times 0.988] = 0.017. \quad (12)$$

系统无法完成任务，处于故障状态的概率：

$$a_3 = 1 - a_1 - a_2 = 1 - 0.962 - 0.017 = 0.021. \quad (13)$$

故  $A=[0.962, 0.017, 0.021]$ 。

### 4.2 系统可信赖度计算

设系统连续作战时间  $t=8$  h，可信赖度  $D$  可构成一个 3 阶矩阵，即：

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

式中： $d_{ij}(i=1, 2, 3; j=1, 2, 3)$  为系统在任务过程中由  $i$  状态转移到  $j$  状态的概率，系统在战斗中一旦出现故障，则在战斗结束之前都不可修复。

$$d_l = \exp(-t / MTBF_1) = \exp(-8 / 50) = 0.84;$$

$$d_t = \exp(-t / MTBF_2) = \exp(-8 / 80) = 0.90;$$

$$d_r = \exp(-t / MTBF_3) = \exp(-8 / 40) = 0.80. \quad (15)$$

式中： $d_l$  为雷达系统的可靠性； $d_t$  为导弹系统的可靠性； $d_r$  为火炮系统的可靠性。

$d_{11}$  为系统在任务开始和结束时均处于工作状态的概率：

$$d_{11} = d_l d_t d_r = 0.84 \times 0.90 \times 0.80 = 0.605. \quad (16)$$

$d_{12}$  为任务开始时系统处于工作状态，任务期间一部拦截系统发生故障的概率：

$$d_{12} = d_l [d_t(1 - d_r) + (1 - d_t)d_r] = 0.84 \times [0.90 \times 0.20 + 0.1 \times 0.8] = 0.218. \quad (17)$$

$d_{13}$  为任务开始时系统处于工作状态，任务期间系统发生故障，无法完成任务的概率：

$$d_{13} = 1 - d_{11} - d_{12} = 1 - 0.605 - 0.218 = 0.177. \quad (18)$$

$d_{22}$  为只有某一拦截系统全程处于工作状态，系统能够完成任务的概率：

$$d_{22} = d_l (d_t + d_r) / 2 = 0.84 \times (0.90 + 0.80) / 2 = 0.714. \quad (19)$$

$d_{23}$  为在任务开始时有一部拦截系统正常工作，任务结束时系统处于故障状态的概率：

$$d_{23} = 1 - d_{22} = 1 - 0.714 = 0.286。 \quad (20)$$

由于系统在任务过程中对发生的故障不能进行修复，故障状态不可能转变为工作状态，即： $d_{21} = d_{31} = d_{33} = 0, d_{33} = 1$ 。故：

$$D = \begin{bmatrix} 0.605 & 0.218 & 0.177 \\ 0 & 0.714 & 0.286 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (21)$$

### 4.3 固有能力的计算

由于末端防御武器系统在实际作战过程中有全部工作状态、部分工作状态和故障状态，故系统固有能力的表示为：

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}。 \quad (22)$$

系统全部处于工作状态的概率：

$$c_1 = W_1N_1 + W_2N_2 + W_3N_3 = 0.5 \times 0.8 + 0.3 \times 0.8 + 0.2 \times 0.7 = 0.86。 \quad (23)$$

只有一个拦截系统工作状态的概率：

$$c_2 = W_1N_1 + W_2(1 - N_2) * W_3N_3 + W_2N_2 * W_3(1 - N_3) = 0.43。 \quad (24)$$

系统处于故障状态的概率： $c_3 = 0$ 。故：

$$C = \begin{bmatrix} 0.86 \\ 0.43 \\ 0 \end{bmatrix}。 \quad (25)$$

### 4.4 求该型末端防御武器系统作战时的系统效能

其系统效能为：

$$E = A \cdot D \cdot C = [0.962, 0.017, 0.021]$$

$$\begin{bmatrix} 0.605 & 0.218 & 0.177 \\ 0 & 0.714 & 0.286 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.86 \\ 0.43 \\ 0 \end{bmatrix} = 0.596。 \quad (26)$$

该型末端防御武器系统在此作战背景下的系统效能  $E$  为 59.6%，是系统在不同状态下完成某项任务的综合性指标，集中反映了该型末端防御武器系统在实战环境中的可靠性及其完成战斗任务的综合能力。

### 5 结束语

笔者通过分析末端防御武器系统发展现状，根据该型末端防御武器系统的结构组成，建立科学的效能评价指标体系，并采用 WSEIAC 模型计算出系统完成作战任务的综合能力。计算结果能够反映装备的实际作战效能，为指挥决策和装备研制等提供参考。

### 参考文献：

- [1] 张方宇, 杨帆, 张筱波. 末端防御武器火控系统面临的挑战与发展建议[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 25-27, 41.
- [2] 刘腾谊, 陈佳音. 国外弹炮结合防空武器系统分析[J]. 火控雷达技术, 2009, 38(4): 22-27.
- [3] 方洋旺, 伍友利, 方斌. 机载导弹武器系统作战效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 2.
- [4] 谢春燕, 高俊峰, 朱齐阳. 末端防御弹炮结合武器系统综合效能评估模型研究[J]. 上海航天, 2010, 27(4): 49-55.
- [5] 王其林, 程杰, 牛效兵, 等. 基于 WSEIAC 模型的某型舰炮武器系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2009, 28(5): 19-20.